

Contribuição do sensoriamento remoto e da aerogeofísica na caracterização dos controles estruturais no alojamento de granitos proterozóicos em zonas de cisalhamento, em parte do Estado de Rondônia (Brasil).

Athos Ribeiro dos Santos¹
Paulo Veneziani (*in memoriam*)
Rosana Okida²
Jorge Silva Bettencourt³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
CP 515, CEP 12201-970, São José dos Campos, SP – Brasil.
athos@ltid.inpe.br

²Av. Madre Paula de São José, 86/34B
CEP 12243-010, São José dos Campos, SP – Brasil.
rokida@ig.com.br

³Universidade de São Paulo – IG/USP
Rua do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP – Brasil.
jsbetten@usp.br

Abstract. The study area is located in SW Amazon Craton. This region is part of the WNW-ESE Intraplate Strike-Slip Belt with Meso/Neoproterozoic ages. Significant advances in understanding the tectonic stratigraphic evolution of the central – southern region in the Rondônia state were acquired by using the following: 1- spaceborne optical (Landsat TM) imagery; 2- aerial side looking radar (GEMS) imagery; 3- digital integrated products Landsat TM/aerial gamma-spectrometry and; 4- field work along previous selected profiles. The Proterozoic period in the region was characterised by an intensive, extensive and persistent granitization. The oldest Proterozoic magmatic event is represented in the region by the widespread mangerite-charnockite-granite association (MCG) and mafic rocks of the Serra da Providência Intrusive Suite (1570 – 1530 Ma). After several magmatic events, the Proterozoic granitogenesis was closed by anorogenic A-type rapakivi granites of the Younger Granites of Rondônia (YGR) (1.00-0.97 Ga). The more important tin deposits in the Rondônia state are closely associated with the late-stage peraluminous granites of the YGR. The optical remote sensing data (TM-Landsat-5) requires a radiometric and geometric corrections to digital integration with airborne gamma-ray data. The gamma-ray data were corrected and resampled to a common pixel size (30 m) and transformed to pseudo-colour images. The digital integration was based on digital image processing techniques (IHS transformation). Airborne X-band SAR mosaics were acquired by GEMS-1000 (General Electric Mapping SAR) in airborne flights with a north –south direction and illumination to west. The geological interpretation of these products makes possible to identify the principal lithological units and seven orientations of crustal weakness lines with regional extensions in the studied area: \pm N80W, \pm N70W, \pm N40W, \pm N-S, \pm N30E, \pm N60E and \pm N80E. The recognition of regional kinematic indicators in the remote sensing imagery it was possible to identify three ductile and brittle transpression phases, locally transtensive. In conformity with shear belt granite emplacement models, it is suggested that transtensive structures like rhombo-chasms (brittle levels) and releasing bends (brittle to ductile levels) created favourable conditions for emplacement of granitic massifs in the studied area.

Palavras-chave: TM-Landsat-5, SAR, gama, gamma-ray, IHS, alojamento de granitos, granite emplacement, Rondônia State.

1. Introdução

A área de estudo (**Figura 1**), situada na porção SW do Craton Amazônico, apresenta características tectono-estruturais que permitem incluir a sua evolução proterozóica dentro de um cinturão de deformação *strike-slip* (Veneziani et al. 2005b). Este período é marcado, na região, por uma intensa, extensa e persistente granitização. Dentro de um contexto evolutivo predominantemente compressivo durante o Proterozóico, áreas transtensivas localizadas puderam ser formadas pela combinação de direções trativas resultantes do sistema de esforços vigente.

Este estudo baseia-se na identificação, nas imagens de sensoriamento remoto e na aerogeofísica, das principais linhas de fraqueza crustal atuantes durante o Proterozóico e na caracterização de indicadores cinemáticos resultantes das deformações desenvolvidas neste período; os resultados obtidos permitiram delimitar regiões transtensivas onde estruturas do tipo *rhombo-chasms/releasing bends* criaram condições favoráveis para a ascensão e o alojamento dos maciços graníticos.

2. Conjunto de dados & métodos

As imagens TM-Landsat, após os procedimentos convencionais de correção radiométrica e geométrica, foram integradas através da técnica de transformação RGB-IHS aos dados aerogamaespectrométricos (CT, K, U e Th). O conjunto de dados foi completado por Mosaicos SAR, banda X, obtidos pelo sensor GEMS 1000 (*General Electric Mapping SAR*) em aerolevanteamento com linhas N-S e azimute W.

Os dados geofísicos, cedidos pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, possuem intervalo de amostragem de 1 segundo, altura de vôo de 150 metros, direção de linha de vôo N-S e espaçamento de 2 quilômetros entre as linhas de vôo. Os dados aerogamaespectrométricos foram “mosaicados” e “gridados” a partir do algoritmo de mínima curvatura (RANGRID). Foram efetuadas interpolações que geraram malhas regulares, cujas dimensões das células equivalem a 1/4 do espaçamento médio, nominal, entre as linhas de vôo, isto é, 500 metros. Essas malhas foram reamostradas para um tamanho comum de pixel (30 m) utilizando interpolador cúbico, a fim de serem integradas com o mosaico das imagens Landsat. As malhas reamostradas para 30 metros foram escalonadas de 32 *bits* para 8 *bits*, georreferenciadas e transformadas para pseudo-cor, para posterior integração com o mosaico das imagens Landsat.

As imagens Landsat-5 foram corrigidas geometricamente utilizando polinômio de 1^o grau e interpolador vizinho-mais próximo. Os erros quadráticos médios foram em torno de 30 m. Após a correção geométrica, fez-se a retificação radiométrica de todas as imagens.

A metodologia empregada para a geração dos produtos integrados foi a transformação IHS (*Intensity, Hue, Saturation*) (Harris e Murray, 1990). No sistema IHS as cores podem ser descritas por três grandezas quantitativamente específicas e independentes sob o ponto de vista da percepção visual: (a) Intensidade (I); (b) Matiz (H); (c) Saturação (S). A relação entre essas grandezas com o espaço RGB é feita por modelos de transformação, que permitem a manipulação das composições coloridas do espaço RGB, no domínio do espaço IHS. Posteriormente, fez-se a transformação inversa, IHS para RGB, substituindo o canal intensidade (I) original pelo produto com maior resolução espacial, preservando o canal matiz (H) e substituindo o canal saturação (S) por um valor de nível de cinza constante (DN), com o intuito de realçar as cores. Para a integração Landsat-5 e dados aerogamaespectrométricos, o canal I foi substituído pela banda 4 e a matiz pela pseudo-cor dos dados aerogamaespectrométricos.

A metodologia de interpretação geológica dos produtos integrados baseou-se em critérios morfoestruturais estabelecidos para imagens de sensoriamento remoto de baixa resolução

espacial (Veneziani e Anjos, 1982), adaptados às peculiaridades das integrações digitais envolvendo dados ópticos e gama (Santos et al. 2001). Neste caso, a textura da imagem representa, principalmente, as propriedades físico-químicas dos materiais superficiais fornecidas pelos dados TM-Landsat-5 e; os matizes representam informações sobre variações composicionais das rochas aflorantes, mapeadas pelos dados radiométricos. O ótimo realce morfológico (macro e micro-topografias), característico da visão oblíqua dos sensores SAR, dá fundamento à identificação dos elementos naturais de paisagem, associando-lhes, através de critérios morfoestruturais, um significado geológico.

3. Contexto geológico

A área de estudo, situada no SW do Craton Amazônico (**Figura 1**), engloba partes das províncias Rio Negro – Juruena (1,8 a 1,55 Ga) e Rondoniana – San Ignacio (1,45 a 1,3 Ga), de acordo com a subdivisão de províncias geocronológicas proposta por Tassinari (1996).

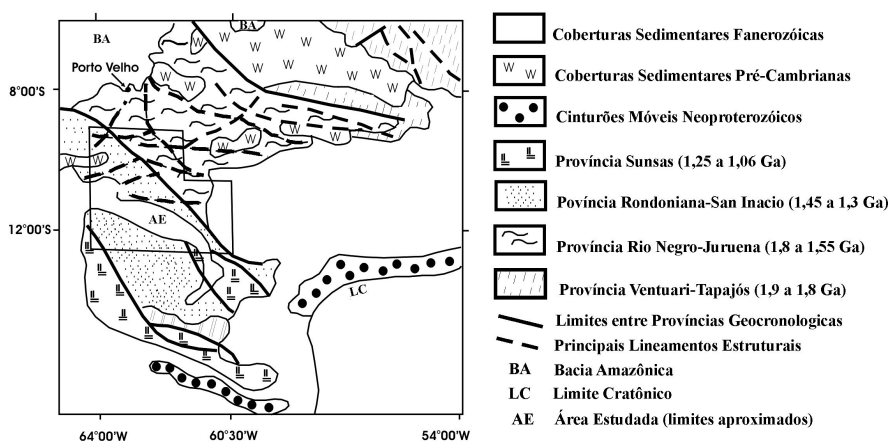


Figura 1 – Distribuição das províncias geocronológicas no SW do Craton Amazônico (modificado de Tassinari, 1996). Em destaque a localização da área de estudo.

A evolução tectônica proterozóica da área de estudo é típica de um cinturão de deformação *strike-slip* intraplacas, com *trend* principal WNW-ESE, sendo possível caracterizar três fases transpressivas, localmente transtensivas, com deformações variando de dúctil a rúptil (Veneziani et al., 2005b). Estas fases foram diferenciadas ao longo do tempo (do Eo ao Neoproterozóico) e em intensidade, resultando em inversões no sentido dos movimentos (ora destrais, ora sinistrais) ao longo da direção principal WNW-ESE. A formação de estruturas transtensivas do tipo *releasing bends* (nível dúctil) e *rhombo-chasms* (nível rúptil), através da combinação geométrica dada pela disposição espacial das direções principais e secundárias, criaram condições favoráveis, em áreas e épocas específicas, à formação de bacias, à sedimentação, ao vulcanismo e à intrusão de corpos graníticos. A terceira fase de movimentação, por ser essencialmente rúptil, foi especialmente favorável à formação desses tipos de estruturas em regiões transtensivas (Okida, 2001; Veneziani et al., 2005a).

Scandolaro e Amorim (1999) definiram para a região de Rondônia a Faixa Móvel Guaporé como uma extensa zona tectônica, com deformações policíclicas, relações metamórficas complexas e granitização significativa. Os autores definiram associações petrotectônicas onde destacaram diversas suítes graníticas. As suítes intrusivas Serra da Providência, Santo Antônio/Teotônio, Alto Candeias e São Lourenço – Caripunas foram situadas como Unidades do

Embasamento, com idades de 1,85 a 1,30 Ga. As suítes Granítica Rio Pardo, Intrusiva Costa Marques e Intrusiva Santa Clara e os *Younger Granites of Rondônia* (YGR) foram agrupados como Suítes Plutônicas com idades entre 1,08 e 0,95 Ga. As unidades geológicas na área de estudo e suas principais litologias estão representadas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Unidades Geológicas na área de estudo (Modificado de Scandolara et al. 1997).

IDADE	UNIDADE GEOLÓGICA
CENOZÓICO	COBERTURAS CENOZÓICAS Depósitos Aluvionares de Canais Fluviais e de Planícies de Inundação (QH) Cobertura Sedimentar Indiferenciada (TQ)
MESOZÓICO	BACIA DOS PARECIS Formação Parecis (Kp1, Kp3): rochas clásticas de origem eólica e fluvial.
PALEOZÓICO	Formação Fazenda da Casa Branca (Pc.): rochas clásticas. Formação Pimenta Bueno (PCpb): rochas clásticas Formação Cacoal (SDc): rochas clásticas e calcário
NEOPROTEROZÓICO	BACIA DE RONDÔNIA Formação Palmeiral (MNp3): rochas clásticas e vulcânicas <i>Younger Granites</i> de Rondônia (YGR) FAIXA OROGÊNICA POLICÍCLICA GUAPORÉ Suíte Intrusiva Santa Clara (Nsc): granitos Básicas Nova Floresta (Nnf): rochas máficas e ultramáficas Suíte Ígnea Costa Marques (Ncm): granitos Suíte Granítica Rio Pardo (Nrp): granitos
MESOPROTEROZÓICO	Suíte Intrusiva Básico – Ultrabásica Cacoal (Mc): rochas básicas e ultrabásicas Seqüência Metavulcano-Sedimentar Nova Brasilândia (Mnb): rochas metavulcânicas e metassedimentares Suíte Intrusiva Alto Candeias (Mac): granitos Suíte Intrusiva Serra da Providência (Msp): granitos e charnockitos
MESOPROTEROZÓICO A EOPROTEROZÓICO	Grupo Beneficente (Mb): rochas metavulcano-sedimentares Suíte Vulcânica Roosevelt (Mr): rochas metavulcânicas Complexo Santa Luzia (PMsl): granulitos Complexos Jamari e Jaru (PMjj): orto e paragneisses

4. Corpos graníticos em zonas de cisalhamento

Estudos feitos a partir da análise de dados litoestruturais e geofísicos em cinturões de cisalhamento mostraram uma estreita associação entre estas mega estruturas e o alojamento de corpos graníticos (Pettersson e Fowler, 1993). A partir desses estudos, o modelo clássico do diapirismo como principal mecanismo de alojamento dos corpos graníticos vem sendo modificado.

O mecanismo de propagação de diques é considerado o mais importante na movimentação de magmas graníticos. Ele permite a ascensão de magmas associados às regiões orogênicas por

intermédio dos fraturamentos profundos, falhas de distensão com mais de 40 km de profundidade (Clemens e Mawer, 1992). O desenvolvimento das fraturas de distensão, profundas, resulta de esforços regionais e, freqüentemente, elas se associam às zonas de falhas transcorrentes, propiciando o alojamento de magmas em níveis crustais bastante rasos (Hutton, 1982).

A forma mais comum de alojamento de corpos graníticos em zonas de cisalhamento é através de porções extensionais com forma romboédrica (*rhombo-chasms* ou *releasing bends*), formadas por falhas ou zonas de cisalhamento transcorrentes *en echelon* (Hutton, 1996).

5. Resultados

O entendimento dos controles tectono-estruturais que permitiram a ascensão e o alojamento de diferentes maciços graníticos na área de estudo passa pela compreensão dos movimentos tectônicos que se desenvolveram regionalmente durante a tectônica predominantemente compressiva do Proterozóico. A porção SW do Craton Amazônico é marcada por extensas zonas de fraquezas crustais (N70W, N60E, N30W, N30E, E-W, N-S e N50W), com *trend* principal WNW-ESE. As características dessas estruturas de alto ângulo, a longevidade das deformações evidenciada pelas diferentes fases de movimentação e a sua natureza penetrativa profunda são características de evolução de um cinturão de deformação *strike-slip* intraplacas (Storti et al. 2003).

Dados de campo, geocronológicos, geofísicos, petrográficos, etc., integrados através de imagens de sensores remotos permitiram identificar três fases de movimentação no período que vai do Eo ao Neoproterozóico (Veneziani et al., 1996, 2005a,b; Okida, 2001).

Na primeira fase, responsável pelo *fabric* dúctil das rochas infracrustais, ocorreram deslocamentos sinistrais ao longo das zonas de fraquezas orientadas segundo WNW-ESE. Correlaciona-se ao estágio compressivo do ciclo orogênico Rio Negro-Juruena (1,80 -1,55 Ga).

Na segunda fase ocorreu inversão, com movimentação dextral oblíqua dúctil-rúptil. Este evento correlaciona-se à Orogenia Rondoniana-São Ignácio (1,45 a 1,30 Ga) e gerou estruturas transpressivas e transtensivas/ duplexes divergentes localizados.

Na terceira fase, a direção principal passou a orientar-se em torno de N70W, com deslocamentos sinistrais rúptil a rúptil-dúctil. É parcialmente correlacionável à Orogenia Sunsás (1,25 a 1,06 Ga). Gerou duplexes divergentes/bacias romboédricas.

A **Figura 2A** mostra que o arranjo das zonas de cisalhamento rúptil-dúctil da segunda fase de movimentação que predominavam nesta área (N45W, Y ou D; N60E, R'; E-W, P e N70W, R) criaram condições transtensivas (divergência/separação de blocos) que permitiram o alojamento/intrusão do corpo granítico da Suíte Serra da Providência. Os movimentos associados às direções de cisalhamento N45W (Y ou D) e N60E (R') são os determinantes principais no alojamento do maciço granítico, caracterizando, juntamente com as direções secundárias, uma estrutura extensional romboédrica, em concordância com o modelo proposto por Hutton (1996). A forma irregular do corpo e o caráter predominantemente maciço das rochas da Suíte Serra da Providência são indicativos de seu alojamento em um ambiente transtensivo (Ebert et al., 1995; Hutton, 1996). A persistência, nesta mesma área, de condições transtensivas durante a terceira fase de movimentação resultou no alojamento do Maciço Massangana (YGR), ocupando grande parte desta área de ocorrência da Suíte Serra da Providência (ver **Figura 4**).

A **Figura 2B** é outro exemplo em que o arranjo das zonas de cisalhamento rúptil-dúctil na região (principalmente as direções N45W, Y ou D; N10W, T; N-S, X e, mais a sul E-W, P) permitiu a criação de estruturas transtensivas favoráveis ao alojamento de corpos graníticos

durante o magmatismo Serra da Providência. A direção principal de cisalhamento N45W (Y ou D) e a direção trativa N10W são os controles principais na intrusão do maciço granítico em uma estrutura transtensiva do tipo *releasing bends/rhomb-chasms*, confirmando a predominância deste tipo de estrutura como sítio de alojamento de granitos em zonas de cisalhamento (Hutton, 1996).

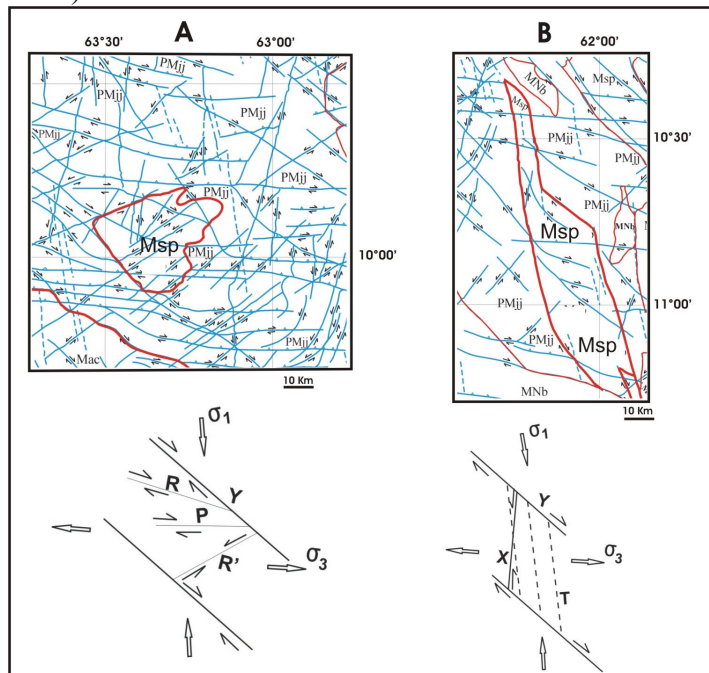


Figura 2 - Exemplos de estruturas transtensivas formadas pela disposição geométrica das zonas de cisalhamento rúptil-dúctil da segunda fase de movimentação (baseados em mapa regional de Veneziani et al., 2005b), que criaram condições favoráveis ao alojamento de corpos graníticos da Suíte Intrusiva Serra da Providência (Msp). Detalhes no texto e legenda na **Tabela 1**.

A **Figura 3** exemplifica uma área de ocorrência da Suíte Intrusiva Rio Pardo onde o controle é claramente exercido pelas zonas de cisalhamento rúptil-dúctil N70W (Y ou D) e N60E (T), constituindo uma estrutura de afastamento do tipo *rhomb-chasms*. Observações de campo indicam também a importância de zonas de cisalhamento rúptil-dúctil com orientação N-S/ver. (X) e movimentação destal, próximo ao contato com a Seqüência Nova Brasilândia.

O alojamento dos granitos anorogênicos de Rondônia (*Younger Granites of Rondônia – YGR*) é relacionado à formação de estruturas transtensivas desenvolvidas durante a cinemática da terceira fase de movimentação (Okida, 2001, Veneziani et al., 2005b). Duas direções de zonas de cisalhamento tiveram papel fundamental na formação das estruturas de afastamento do tipo *rhomb-chasms/releasing bends* que permitiram o alojamento dos granitos anorogênicos: a direção principal de cisalhamento (Y ou D), com movimentação sinistral, posicionada em N70W e as estruturas trativas (T), orientadas em N60E. As direções N-S (X) e N45E (R') tiveram um papel secundário na formação dessas estruturas transtensivas (**Figura 4**).

6. Conclusões

A visão sinóptica das imagens de sensoriamento remoto integradas aos dados gama se mostrou eficiente na identificação e caracterização das principais estruturas e unidades geológicas de distribuição regional na área de estudo. Essas informações aliadas à dados geocronológicos, petrológicos e litoestruturais de campo permitiram identificar e hierarquizar 3 fases de deformação/movimentação, que ocorreram em um regime tectônico predominantemente

Referências

- Clemens, J.D. e Mawer, C.K. Granitic magma transport by fracture propagation. **Tectonophysics**, v. 204, p. 339-360, 1992.
- Ebert, H.D.; Neves, M.A.; Hutton, D.H.W.; Guerra, M. Alojamento de rochas plutônicas em regimes transpressivos: uma modelagem experimental. In: SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 5, 1995, Gramado, **Resumos Expandidos ...** Gramado 1995, p. 186-188.
- Harris, J.R. e Murray, R. IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 56, p. 1631-1641, 1990.
- Hutton, D.H.W. A tectonic model for the emplacement of the Main Donegal Granite, NW Ireland. **J. Geol. Soc. London**, v. 139, p. 615-631, 1982.
- Hutton, D.H.W. The “space problem” in the emplacement of granite. **Episodes**, v. 19, n. 4, p. 114-119, 1996.
- Okida, R. **Aplicação de sensoriamento remoto e aerogamaespectrometria ao estudo do controle estrutural dos granitos estaníferos de Rondônia**. 2001. 217 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- Paterson, S.R. e Fowler Jr, T.K. Re-examining pluton emplacement processes. **Jour. Struct. Geology**, v. 15, p. 191-206, 1993.
- Santos, A.R.; Veneziani, P.; Paradella, W.R.; Morais, M.C. **Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: Aplicações**. Curso INPE-ADIMB, São José dos Campos, 21-26 de Agosto de 2000. São José dos Campos, INPE, 2001, 103p (INPE-8117-PUD/45).
- Scandolaro, J.E. e Amorim, J.L. A Faixa Móvel Guaporé, sua definição e inserção no contexto geotectônico do SW do Craton Amazônico. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 6, Manaus, 1999. **Anais...**, Manaus, p. 278-281.
- Scandolaro, J.E. (coord.) **Mapa Geológico do Estado de Rondônia. Texto Explicativo**. CPRM, 1997, 97p.
- Storti, F.; Holdsworth, R.E.; Salvini, F. Intraplate strike – slip deformation belts. Geological Society. London. **Special Publications**, v. 210, p. 1-14, 2003.
- Tassinari C.G.C. **O Mapa Geocronológico do Craton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos**. 1996. 139p. Tese de Livre-Docência. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- Veneziani, P. e Anjos, C.E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia**. São José dos Campos, INPE, 1982. 61p. (INPE-2227-MD/014).
- Veneziani, P.; Anjos, C.E.; Bettencourt, J.S.; Okida, R. Caracterização de movimentos tectônicos ao longo das principais linhas de fraqueza do Estado de Rondônia, com imagens TM-Landsat: resultados preliminares. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, 1996. **Boletim de Resumos Expandidos**, Salvador, v. 2, p. 455-458.
- Veneziani, P.; Okida, R.; Santos, A.R.; Bettencourt, J.S. A influência de movimentos transtensivos nos controles dos alojamentos dos granitos jovens (YGR) e do embaciamento neoproterozóico – paleozóico no Estado de Rondônia. In: SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 10, Curitiba, 2005a. **Resumos Expandidos**, Curitiba.
- Veneziani, P.; Santos, A.R.; Bettencourt, J.S.; Okida, R. Mapa tectono-estratigráfico da região centro-sul do Estado de Rondônia baseado em dados integrados de sensores remotos e gamaespectrométricos”. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, **Anais...** Geologia, Goiânia, 16-21 de abril de 2005b, CD-ROM, p. 1923-1931.